

УДК 621.398:628.971

## УТОЧНЕНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЕ–ЧАСТОТА

**П. П. ИЗOTOV**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

В [1, с. 121] описана схема преобразователя напряжение–частота (ПНЧ), принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Также в [1] представлен упрощенный расчет ПНЧ.

Проведенное исследование ПНЧ выявило, что необходимо уточнение данного расчета.

Так как было замечено, что при увеличении отношения  $\frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{п}}}$ , где  $t_{\text{и}}$  – ширина импульса, а  $t_{\text{п}}$  – ширина паузы выходного сигнала  $U_{\text{вых}}(t)$  (рис. 2), от 0 до 1 соответственно растет погрешность расчета от 0 до 100 %. Также было замечено, что выбор резистора  $R3$  (рис. 1) по методике, приведенной в [1], может приводить к существенной погрешности расчета.

Первая погрешность расчета обусловлена тем, что при разработке упрощенного расчета ПНЧ в [1] не учитывалась величина  $t_{\text{и}}$ , т. е. принималось  $t_{\text{и}} \rightarrow 0$ . Вторая погрешность расчета обусловлена тем, что условие  $R > R3$  при  $\frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{п}}} \neq 0$  является неприемлемым при выборе резистора  $R3$ .

### Постановка задачи

Определить зависимость  $f$  частоты выходного сигнала  $U_{\text{вых}}(t)$  от  $U_{\text{вх}}$  величины входного сигнала ПНЧ с учетом величины ширины импульса  $t_{\text{и}}$  в установившемся режиме работы ПНЧ. Разработать уточненную методику расчета ПНЧ и уточненное условие выбора резистора  $R3$ .

### Основная часть

Период частоты  $f$  (рис. 2) определяется как [1]:  $T = t_{\text{и}} + t_{\text{п}}$ .

Частота выходного сигнала ПНЧ обратно пропорциональна периоду  $T$  [1]:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{\text{и}} + t_{\text{п}}} = \frac{1}{t_{\text{п}}} \frac{1}{1 + \frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{п}}}}. \quad (1)$$

В [1] принимается  $\frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{п}}} \rightarrow 0$ . В этом случае частота выходного сигнала ПНЧ обратно пропорциональна  $t_{\text{п}}$  продолжительности паузы [1]:

$$f \approx f^* = \frac{1}{t_{\text{п}}}.$$

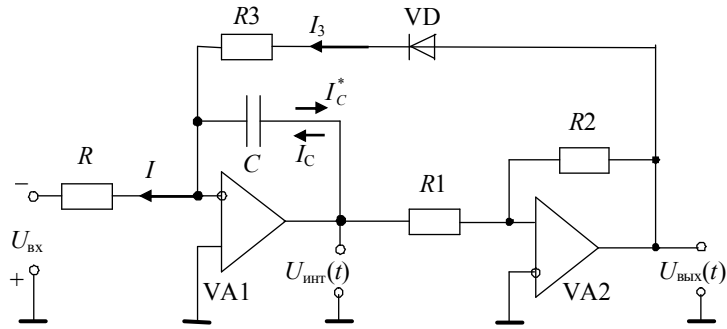


Рис. 1. Преобразователь напряжение–частота (ПНЧ) [1]

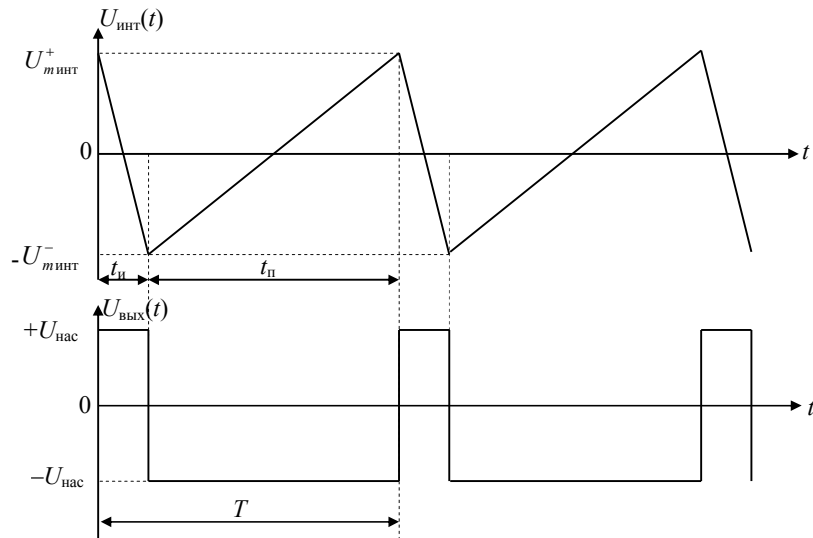


Рис. 2. Временные диаграммы выходного сигнала интегратора  $U_{\text{инт}}(t)$  и выходного сигнала ПНЧ  $U_{\text{вых}}(t)$  в установившемся режиме работы ПНЧ

Величину погрешности расчета ПНЧ, проведенного по методике [1], можно определить как

$$\delta = \frac{f^* - f}{f} 100 \% = \frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{п}}} 100 \% .$$

Как видно из формулы, величина погрешности  $\delta$  зависит прямо пропорционально от отношения  $\frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{п}}}$ . Чтобы избавиться от  $\delta$ , необходимо вначале определить зависимость  $t_{\text{п}}$  и  $t_{\text{и}}$  от величины входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , а затем, используя полученные выражения  $t_{\text{п}}$  и  $t_{\text{и}}$ , определить  $f$ .

### 1. Зависимость ширины паузы $t_{\text{п}}$ от величины $U_{\text{вх}}$

Ширина паузы  $t_{\text{п}}$  формируется интегратором VA1 из отрицательного постоянного входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ . Выходной сигнал интегратора  $U_{\text{инт}}(t)$ , с учетом  $I_C$  тока заряда конденсатора  $C$  (см. рис. 1), можно представить следующим образом:

$$U_{\text{инт}}(t) = \frac{1}{C} \int I_C dt.$$

Формирование  $t_{\text{п}}$  рассматривается на участке от  $t = t_{\text{и}}$  до  $t = t_{\text{и}} + t_{\text{п}}$  (рис. 2). На этом участке величина выходного сигнала интегратора изменяется от  $U_{\text{инт}}(t_{\text{и}}) = -U_{\text{минт}}^-$  до  $U_{\text{инт}}(t_{\text{и}} + t_{\text{п}}) = U_{\text{минт}}^+$  (рис. 2). Поэтому можно перейти к определенному интегралу:

$$U_{\text{инт}}(t_{\text{и}} + t_{\text{п}}) - U_{\text{инт}}(t_{\text{и}}) = U_{\text{м инт}}^+ + U_{\text{м инт}}^- = \frac{1}{C} \int_{t_{\text{и}}}^{t_{\text{и}}+t_{\text{п}}} I_C dt.$$

Принимая во внимание, что  $I_C$  – ток постоянный, так как формируется  $U_{\text{вх}}$  источником постоянного напряжения, можно получить зависимость выходного сигнала интегратора  $U_{\text{инт}}(t)$  при изменении его величины от  $U_{\text{м инт}}^-$  до  $U_{\text{м инт}}^+$  за время  $t_{\text{п}}$ :

$$U_{\text{м инт}}^+ + U_{\text{м инт}}^- = \frac{1}{C} \int_{t_{\text{и}}}^{t_{\text{и}}+t_{\text{п}}} I_C dt = \frac{I_C}{C} t \Big|_{t_{\text{и}}}^{t_{\text{и}}+t_{\text{п}}} = \frac{I_C}{C} (t_{\text{и}} + t_{\text{п}} - t_{\text{и}}) = \frac{I_C}{C} t_{\text{п}}.$$

Если  $U_{\text{м инт}}^+$  и  $U_{\text{м инт}}^-$  принять равными по модулю, то  $|U_{\text{м инт}}^+| = |U_{\text{м инт}}^-| = U_{\text{м инт}}$ . Тогда получается зависимость амплитуды  $U_{\text{м инт}}$  выходного сигнала интегратора  $U_{\text{инт}}(t)$  от величины ширины паузы  $t_{\text{п}}$ :

$$2U_{\text{м инт}} = \frac{I_C}{C} t_{\text{п}}.$$

Если интегратор выполнен на идеальном операционном усилителе, то при формировании паузы  $t_{\text{п}}$  ток заряда конденсатора  $I_C$  равен току  $I$  входного источника напряжения  $U_{\text{вх}}$ :

$$I_C = I.$$

Ток  $I$  равен:

$$I = \frac{U_{\text{вх}}}{R}. \quad (2)$$

Зависимость продолжительности паузы  $t_{\text{п}}$  от входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  принимает вид [1]:

$$t_{\text{п}} = 2R \cdot C \frac{U_{\text{м инт}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (3)$$

## 2. Зависимость ширины импульса $t_{\text{и}}$ от величин $U_{\text{вх}}$ и амплитуды $U_{\text{вых}}$

Ширина импульса  $t_{\text{и}}$  формируется интегратором VA1 из  $+U_{\text{нас}}$  постоянного положительного значения амплитуды выходного сигнала через VD и R3 цепь перезаряда конденсатора  $C$  (рис. 1). В этом случае  $U_{\text{инт}}(t)$  выходной сигнал интегратора зависит от величины  $I_C^*$  тока перезаряда конденсатора  $C$ . Принимая во внимание, что  $I_C^*$  направлен противоположно  $I_C$  току заряда, так как формируется источником положительного напряжения, то  $U_{\text{инт}}(t)$  имеет вид:

$$U_{\text{инт}}(t) = \frac{1}{C} \int (-I_C^*) dt.$$

Формирование  $t_{\text{и}}$  рассматривается на участке от  $t = 0$  до  $t = t_{\text{и}}$  (рис. 2). На этом участке величина выходного сигнала интегратора изменяется от  $U_{\text{инт}}(0) = U_{\text{м инт}}^+$  до  $U_{\text{инт}}(t_{\text{и}}) = -U_{\text{м инт}}^-$ . Поэтому можно перейти к определенному интегралу:

$$U_{\text{инт}}(t_{\text{и}}) - U_{\text{инт}}(0) = -U_{\text{м инт}}^+ - U_{\text{м инт}}^- = \frac{-1}{C} \int_0^{t_{\text{и}}} I_C^* dt.$$

Принимая во внимание, что  $I_C^*$  ток перезаряда формируется при  $+U_{\text{нас}}$  постоянном положительном значении амплитуды выходного сигнала, можно получить зависимость выходного сигнала интегратора  $U_{\text{инт}}(t)$  при изменении его величины от  $U_{\text{инт}}^+$  до  $U_{\text{инт}}^-$  за время  $t_{\text{и}}$ :

$$U_{\text{инт}}^+ + U_{\text{инт}}^- = \frac{I_C^*}{C} t_{\text{и}}.$$

Если  $U_{\text{инт}}^+$  и  $U_{\text{инт}}^-$  принять равными по модулю, то  $|U_{\text{инт}}^+| = |U_{\text{инт}}^-| = U_{\text{инт}}$ . Тогда получается зависимость амплитуды  $U_{\text{инт}}$  выходного сигнала интегратора  $U_{\text{инт}}(t)$  от величины ширины импульса  $t_{\text{и}}$ :

$$2U_{\text{инт}} = \frac{I_C^*}{C} t_{\text{и}}.$$

На величину тока  $I_C^*$  влияет не только ток  $I_3$  цепи перезаряда, но и ток  $I$  источника входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  (см. рис. 1). С учетом первого закона Кирхгофа можно выразить зависимость тока  $I_C^*$  от токов  $I_3$  и  $I$ :

$$I_C^* = I_3 - I. \quad (4)$$

Величина тока  $I_3$  равна нулю при отрицательном значении амплитуды  $-U_{\text{нас}}$  выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$ , так как все напряжение падает на обратно включенном диоде VD. При положительном значении амплитуды  $+U_{\text{нас}}$  на величину тока  $I_3$  влияют величины резистора  $R_3$  и напряжение  $U_{\text{VD}}$  на прямо включенном диоде VD:

$$I_3 = \frac{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}{R_3}. \quad (5)$$

С учетом выражений (2) и (5) ток перезаряда принимает вид:

$$I_C^* = \frac{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}{R_3} - \frac{U_{\text{вх}}}{R}.$$

Зависимость ширины импульса  $t_{\text{и}}$  от входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  принимает вид:

$$t_{\text{и}} = \frac{2 \cdot C \cdot U_{\text{инт}}}{I_C^*} = \frac{2 \cdot C \cdot U_{\text{инт}}}{\frac{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}{R_3} - \frac{U_{\text{вх}}}{R}}. \quad (6)$$

### 3. Зависимость частоты выходного сигнала $f$ от $U_{\text{вх}}$ с учетом $t_{\text{и}}$

Период частоты выходного сигнала ПНЧ (рис. 2) с учетом выражений  $t_{\text{и}}$  (6) и  $t_{\text{п}}$  (3) принимает вид:

$$T = t_{\text{и}} + t_{\text{п}} = \frac{2 \cdot C \cdot U_{\text{инт}}}{\frac{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}{R_3} - \frac{U_{\text{вх}}}{R}} + 2 \cdot R \cdot C \frac{U_{\text{инт}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Выражение периода  $T$  можно представить следующим образом:

$$T = \frac{2 \cdot RC \cdot U_{\text{инт}}}{U_{\text{вх}}} \cdot \frac{(U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}) \cdot R}{(U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}) \cdot R - U_{\text{вх}} \cdot R_3}.$$

В этом случае зависимость  $f$  частоты выходного сигнала от величины  $U_{\text{вх}}$  с учетом ширины импульса  $t_{\text{и}}$  можно записать как

$$f = \frac{1}{T} = \frac{U_{\text{вх}}}{2 \cdot RC \cdot U_{\text{м инт}}} \left[ 1 - \frac{U_{\text{вх}} \cdot R3}{(U_{\text{нас}} - U_{\text{вд}})R} \right] = \frac{U_{\text{вх}}}{2 \cdot RC \cdot U_{\text{м инт}}} \left[ 1 - \frac{I}{I_3} \right] \quad (7a)$$

или

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot RC \cdot U_{\text{м инт}}} \left[ U_{\text{вх}} - U_{\text{вх}}^2 \frac{R3}{(U_{\text{нас}} - U_{\text{вд}})R} \right]. \quad (7б)$$

Из выражения (7б) видно, что зависимость частоты выходного сигнала  $f$  от входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  является нелинейной.

### 3.1. Зависимость частоты выходного сигнала $f$ от $U_{\text{вх}}$ без учета $t_{\text{и}}$

В [1] частота выходного сигнала ПНЧ обратно пропорциональна ширине паузы  $t_{\text{п}}$ :

$$f \approx f^* = \frac{1}{t_{\text{п}}}. \quad (8)$$

С учетом выражения (3) зависимость  $f^*$  частоты выходного сигнала от входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  [1]:

$$f^* = \frac{U_{\text{вх}}}{2 \cdot RC \cdot U_{\text{м инт}}}. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), зависимость  $f^*$  частоты выходного сигнала от входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  без учета ширины импульса  $t_{\text{и}}$  имеет линейную зависимость.

### 3.2. Сравнение выражений $f$ и $f^*$

Если сравнить выражения (7) и (9), то можно увидеть, что выражение (7а) при  $\frac{I}{I_3} \rightarrow 0$  принимает вид выражения (9). Увеличение тока  $I_3$  при неизменной емкости конденсатора  $C$  ведет к уменьшению ширины импульса  $t_{\text{и}}$ , т. е. к выполнению условия  $\frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{п}}} \rightarrow 0$ , при котором было получено выражение (9). Отсюда можно сделать вывод, что выражение (9) является частным случаем выражения (7). Поэтому для повышения точности целесообразно вести расчет ПНЧ с учетом выражения (7).

## 4. Уточнение методики расчета ПНЧ

При расчете ПНЧ необходимо определить параметры элементов:  $R$ ;  $C$ ;  $R1$ ;  $R2$ ;  $R3$  (рис. 1) при заданных значениях величины входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  и частоты выходного сигнала  $f$ . Значение сопротивления  $R$  можно выразить из выражения (7б). Для этого вначале выражение (7б) представляется в виде квадратного уравнения:

$$R^2 \cdot 2 \cdot C \cdot U_{\text{м инт}} (U_{\text{нас}} - U_{\text{вд}}) f - R \cdot U_{\text{вх}} (U_{\text{нас}} - U_{\text{вд}}) + U_{\text{вх}}^2 \cdot R3 = 0,$$

а затем определяются корни этого уравнения:

$$R = \frac{U_{\text{вх}} \pm U_{\text{вх}} \sqrt{1 - 8 \cdot f \cdot C \cdot R3 \frac{U_{\text{м инт}}}{U_{\text{нас}} - U_{\text{вд}}}}}{4 \cdot f \cdot C \cdot U_{\text{м инт}}}. \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что реальные значения сопротивления резистора  $R$  существуют при выполнении условия:

$$8 \cdot f \cdot C \cdot R3 \frac{U_{m \text{ инт}}}{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}} \leq 1. \quad (11)$$

Поэтому значения емкости конденсатора  $C$ , сопротивления резистора  $R3$  и величины амплитуды  $U_{m \text{ инт}}$  сигнала интегратора должны выбираться с учетом неравенства (11).

Значения сопротивлений резисторов  $R1$  и  $R2$  определяются из выражения [1]:

$$\frac{U_{m \text{ инт}}}{U_{\text{нас}}} = \frac{R1}{R2}.$$

#### 4.1. Влияния выбора значения резистора $R$ на работу ПНЧ

Из выражения (10) можно увидеть, что значений сопротивления резистора  $R$  существует два:  $R_+$  и  $R_-$ .  $R_+$  – значение сопротивления  $R$  когда в выражении (10) производится операция сложения, а  $R_-$  – когда производится операция вычитания.

Анализируя выражение (10) и неравенство (11), можно заметить, что если левая часть неравенства (11) меньше единицы, то  $R_+ > R_-$ . С учетом выражения (3) можно показать, что при  $R_+$  ширина паузы  $t_{\text{п}}$  выходного сигнала больше, чем при  $R_-$ . Принимая во внимание, что частота и период выходного сигнала при  $R_+$  и  $R_-$  одни и те же, то можно сделать вывод, что при  $R = R_+$  ширина паузы  $t_{\text{п}}$  будет больше ширины импульса  $t_{\text{и}}$  выходного сигнала (рис. 3, а), а при  $R = R_-$  ширина паузы  $t_{\text{п}}$  будет меньше ширины импульса  $t_{\text{и}}$  выходного сигнала (рис. 3, б).

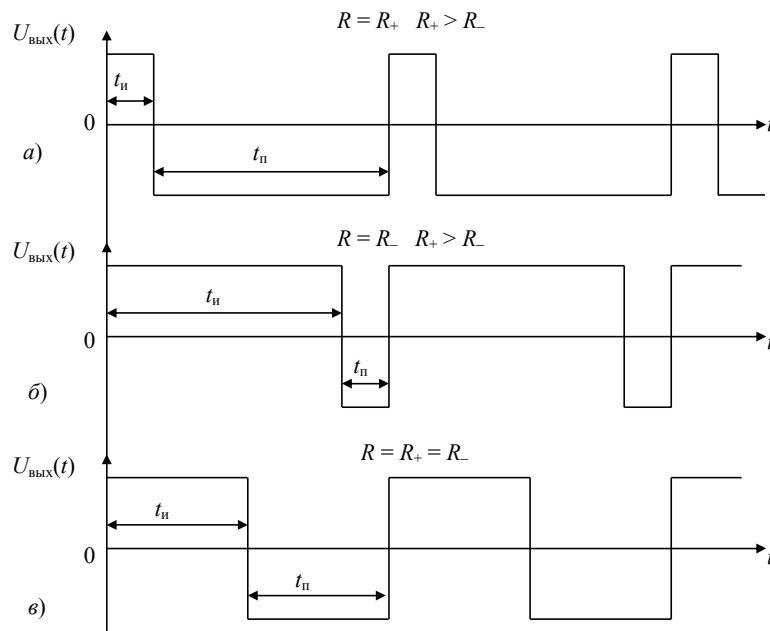


Рис. 3. Временные диаграммы выходного сигнала ПНЧ при различных значениях резистора  $R$ : а – при  $R = R_+$ ; б – при  $R = R_-$ ; в – при  $R = R_+ = R_-$

Если левую часть неравенства (11) приближать к нулю, то при  $R = R_+$  ширина импульса  $t_{\text{и}}$  выходного сигнала будет также приближаться к нулю, а при  $R = R_-$  ширина паузы  $t_{\text{п}}$  будет приближаться к нулю.

Если левая часть неравенства (11) равняется единице, то  $R_+ = R_-$ . В этом случае ширина паузы  $t_{\text{п}}$  будет равна ширине импульса  $t_{\text{и}}$  выходного сигнала (рис. 3, в).

#### 4.2. Влияния выбора значения резистора $R3$ на работу ПНЧ

Из выражения (10) и неравенство (11) видно, что при заданных значениях:  $C$ ,  $U_{m \text{ инт}}$ ,  $U_{VD}$ ,  $f$ ,  $U_{\text{нас}}$  значение резистора  $R3$  должно выбираться с учетом неравенства (11). Также видно из выражения (10), что для выбранного резистора  $R3$  при заданном  $U_{\text{вх}}$  существуют только два значения резистора  $R$  ( $R_+$  и  $R_-$ ).

Если же  $R3$  будет выбираться из условия  $R > R3$  как предлагается в [1], то из выражения (7а) видно, что при заданных значениях:  $C$ ,  $U_{m \text{ инт}}$ ,  $U_{VD}$ ,  $U_{\text{нас}}$  и  $R$  изменение  $R3$  приведет к изменению частоты ПНЧ  $f$ . Также из выражения (7а) видно, что изменение  $R3$  не влияет на  $f$  при  $\frac{I}{I_3} \rightarrow 0$ , т. е. когда  $\frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{п}}} \rightarrow 0$ .

### 4.3. Предельное значение резистора $R3$

Если посмотреть на неравенство (11), то можно увидеть, что при заданных значениях:  $C$ ,  $U_{m \text{ инт}}$ ,  $U_{VD}$ ,  $f$ ,  $U_{\text{нас}}$  существует максимальное значение резистора  $R3$ . Это можно объяснить тем, что с ростом  $R3$  уменьшается величина тока  $I_3$ . Уменьшение тока  $I_3$  влечет за собой увеличение  $t_{\text{и}}$  и уменьшение  $t_{\text{п}}$  при  $R = R_+$  (рис. 3, а) либо наоборот уменьшение  $t_{\text{и}}$  и увеличение  $t_{\text{п}}$  при  $R = R_-$  (рис. 3, б). При максимальном  $R3$  величины  $t_{\text{и}}$  и  $t_{\text{п}}$  одинаковы (см. рис. 3, в), а величиной тока  $I_3$  можно зарядить конденсатор  $C$  от величины  $U_{m \text{ инт}}^+$  до  $-U_{m \text{ инт}}^-$  либо, наоборот, за время, равное периоду  $T$  частоты выходного сигнала ПНЧ  $f$ . Дальнейшее уменьшение тока  $I_3$  увеличит время заряда  $C$  до значений превышающих период  $T$ . Согласно (4) ток  $I_3$  состоит из токов  $I$  и  $I_C^*$ , которые согласно (3) и (6) формируют  $t_{\text{и}}$  и  $t_{\text{п}}$ . Получается если выбрать  $R3$  больше максимального значения, то не возможно получить заданную частоту выходного сигнала ПНЧ  $f$  либо заданную амплитуду выходного сигнала интегратора  $U_{m \text{ инт}}$ .

### 4.4. Порядок расчета ПНЧ

1. Определить по справочнику или экспериментально величину напряжение насыщения  $U_{\text{нас}}$  компаратора VA2.

2. Определить по справочнику или экспериментально величину падения напряжения на диоде VD  $U_{VD}$ .

3. Если амплитуда выходного сигнала интегратора  $U_{m \text{ инт}}$  не задана, то выбрать значение  $U_{m \text{ инт}}$ . Значение  $U_{m \text{ инт}}$  должно быть больше нуля и меньше максимального выходного напряжения операционного усилителя VA1.

4. Рассчитать величину отношения:  $\frac{R1}{R2} = \frac{U_{m \text{ инт}}}{U_{\text{нас}}}$ . Затем, задавшись значением сопротивления резистора  $R1$ , определить величину сопротивления  $R2$ . При выборе резистора  $R1$  необходимо следить, чтобы выходной ток операционного усилителя VA1 не превышал максимально допустимого значения.

5. С учетом выбранных резисторов  $R1$  и  $R2$  скорректировать значение:

$$U_{m \text{ инт}} = \frac{R1}{R2} U_{\text{нас}}.$$

6. Выбрать значение емкости конденсатора  $C$  и рассчитать значение сопротивления резистора  $R3$ :  $R3 \leq \frac{1}{8 \cdot f \cdot C \frac{U_{m \text{ инт}}}{U_{\text{нас}} - U_{VD}}}$ . После выбора резистора  $R3$  проверить, что

выполняется неравенство (11). При проверке должны быть заданы:  $C$  в (Ф),  $R3$  в (Ом),  $f$  в (Гц).

Рекомендуется при выборе  $C$  и  $R3$  выбирать такие значения, чтобы левая часть неравенства (11) стремилась к единице.

7. По заданным значениям входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , частоте выходного сигнала  $f$  и с учетом выбранных значений  $C$  и  $R3$  рассчитать значение сопротивления резистора:

$$R = \frac{U_{\text{вх}} \pm U_{\text{вх}} \sqrt{1 - 8 \cdot f \cdot C \cdot R3 \frac{U_{\text{м инт}}}{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}}}{4 \cdot f \cdot C \cdot U_{\text{м инт}}}.$$

При расчете должно быть заданы:  $R$  в (Ом),  $C$  в (Ф),  $R3$  в (Ом),  $f$  в (Гц).

8. Проверить правильность расчета подстановкой полученных значений элементов ПНЧ в выражение (76).

#### 4.5. Пример расчета ПНЧ

Задано:  $U_{\text{вх}} = 10$  В,  $f = 800$  Гц.

Расчет:

1. Амплитуда выходного сигнала компаратора VA2  $U_{\text{нас}} = 15,7$  В.

2. Напряжение на диоде VD  $U_{\text{VD}} = 0,7$  В.

3. Амплитуда выходного сигнала интегратора  $U_{\text{м инт}} = 5$  В.

4.  $\frac{R1}{R2} = \frac{U_{\text{м инт}}}{U_{\text{нас}}} = \frac{5}{15,7}$ . При  $R1 = 10$  кОм получается  $R2 = 31,4$  кОм.

5. Определяется  $U_{\text{м инт}}$  с учетом выбранных резисторов  $R1$  и  $R2$ :

$$U_{\text{м инт}} = \frac{R1}{R2} U_{\text{нас}} = \frac{10 \cdot 10^3}{31,4 \cdot 10^3} 15,7 = 5 \text{ В.}$$

6. Выбирается  $C = 0,1$  мкФ. Рассчитывается сопротивление:

$$R3 \leq \frac{1}{8 \cdot f \cdot C \frac{U_{\text{м инт}}}{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}} = \frac{1}{8 \cdot 800 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \frac{5}{15,7 - 0,7}} = 4687,5 \text{ Ом.}$$

Выбирается  $R3 = 3$  кОм. Проверяется неравенство (11):

$$8 \cdot f \cdot C \cdot R3 \frac{U_{\text{м инт}}}{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}} = 8 \cdot 800 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^3 \frac{5}{15,7 - 0,7} = 0,64 < 1.$$

7. Рассчитывается сопротивление:

$$R = \frac{U_{\text{вх}} \pm U_{\text{вх}} \sqrt{1 - 8 \cdot f \cdot C \cdot R3 \frac{U_{\text{м инт}}}{U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}}}}}{4 \cdot f \cdot C \cdot U_{\text{м инт}}} = \frac{10 \pm 10 \cdot \sqrt{1 - 0,64}}{4 \cdot 800 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 5}.$$

Получается  $R_+ = 10$  кОм и  $R_- = 2,5$  кОм. Выбирается  $R = R_+ = 10$  кОм.

8. Проверяется правильность расчета:

$$f = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вх}}^2 \frac{R3}{(U_{\text{нас}} - U_{\text{VD}})R}}{2 \cdot RC \cdot U_{\text{м инт}}} = \frac{10 - 10^2 \frac{3 \cdot 10^3}{(15,7 - 0,7)10 \cdot 10^3}}{2 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 5} = 800 \text{ Гц.}$$

#### Заключение

Если рассчитать значения элементов ПНЧ при  $U_{\text{вх}} = 10$  В,  $f = 800$  Гц,  $U_{\text{нас}} = 15,7$  В,  $U_{\text{VD}} = 0,7$  В,  $U_{\text{м инт}} = 5$  В, то получается  $R = 10$  кОм,  $C = 0,1$  мкФ,  $R3 = 3$  кОм,  $R1 = 10$  кОм и  $R2 = 31,4$  кОм. Если по полученным значениям элементов ПНЧ рассчитать значение частоты по методике, приведенной в [1], то получается частота  $f^* = 1000$  Гц. При этом погрешность расчета составляет 25 %.



Согласно (6) при полученных значениях элементов ПНЧ величина импульса  $t_{и} = 0,25$  мс, а согласно (3) величина паузы  $t_{п} = 1$  мс. Получается, что использование приближенной методики [1] при  $\frac{t_{и}}{t_{п}} \geq 0,25$  приводит к погрешности, большей или равной 25 %.

### **Литература**

1. Чубриков, Л. Г. Основы промышленной электроники / Л. Г. Чубриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2003. – 255 с.

– Получено 28.02.2011 г.